

Construire des Ouvrages d'Art en Béton

Les contrôles à postériori

B. Clément (DLA)



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Les contrôles à postériori

SOMMAIRE

- + **Pourquoi des essais**
- + **Les types d'essais**
- + **Les essais**
- + **Conclusion**



Les contrôles à postériori

• POURQUOI DES ESSAIS A POSTERIORI

Avec l'évolution du Fascicule 65, la majeure partie des contrôles en cours de chantier sont dorénavant à la charge de l'entreprise.

« **La confiance n'excluant pas le contrôle** », la maîtrise d'œuvre à la charge de s'assurer que les contrôles de l'entreprise ont bien été réalisés (« *Ils font l'objet de rapports qui doivent être transmis au maître d'œuvre au fur et à mesure de l'obtention des résultats* » - cf CCTP Type) et se réserve le droit d'éventuels essais contradictoires au cours de la réalisation de l'ouvrage, et a ensuite obligation de réceptionner les éléments d'ouvrage.

Les principales sujétions imposées à l'entrepreneur pour faire ses contrôles intérieurs sont inscrites dans le marché.

Le PQ de l'entreprise doit formaliser tout ce qui relève de la réception par le maître d'œuvre ou le client et lui donner toutes facilités utiles pour permettre ses contrôles extérieurs (opérations préalables à la réception et réception proprement-dite)

Dans le cadre d'un ouvrage neuf il s'agit donc essentiellement d'essais utiles à la réception.

Possibilité d'essais d'investigation, mais généralement plus lourds et plus coûteux – à utiliser seulement en cas de litige

Les contrôles à postériori

- **PLUSIEURS TYPES D'ESSAIS**

- **Les essais NON DESTRUCTIFS**

- Il est préférable dans le cas de la construction d'un ouvrage neuf ...

- **Les essais DESTRUCTIFS**

- Il interviendrons seulement en cas de contentieux et sont à la charge du maître d'ouvrage.

- A savoir que dans ce cas, si le non respect du marché par l'entreprise est mis en évidence, les frais occasionnés par ces investigations sont pris en charge par l'entreprise ainsi que tous les frais utiles à la réparation.

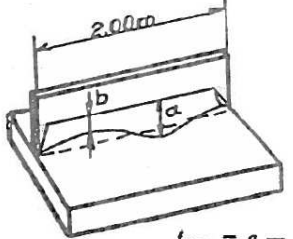
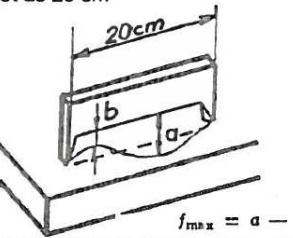
Ex : clause issue du CCTP Type PETRA dans le cas de carottages de fondations profondes suite à des auscultations soniques mettant en évidence des singularités

Si le béton extrait est conforme aux exigences du présent CCTP, les frais correspondants à ces contrôles sont pris en charge par le maître de l'ouvrage. Dans le cas contraire, ils sont à la charge de l'entrepreneur, de même que toutes les mesures qu'il est nécessaire de prendre pour pallier ce défaut (investigations, études complémentaires, pieu supplémentaire, etc.).

Les contrôles à postériori

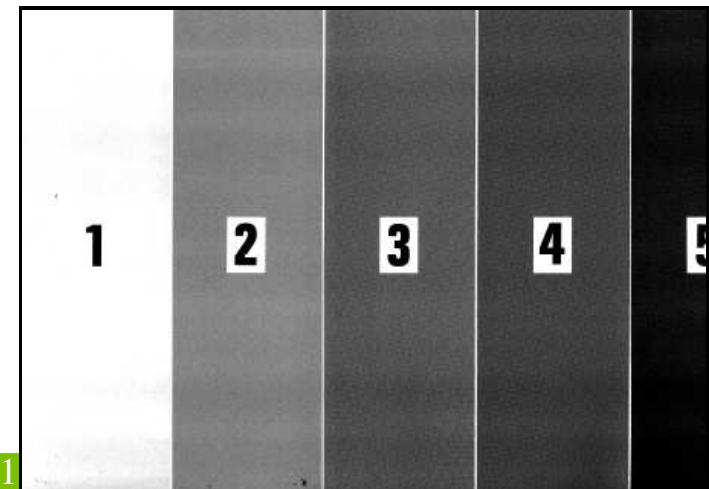
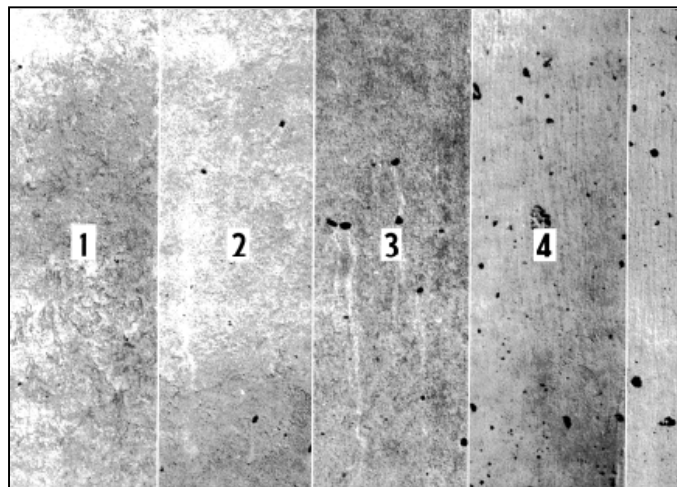
• LES ESSAIS

- ➔ Réception de parement (Déjà évoqué dans les présentations précédentes)

DÉFAUTS DE FORME	PAREMENTS	
	Simples.	Fins.
Planéité d'ensemble, rapportée à la règle de 2 m.  $f_{max} = a - b.$	8 mm	5 mm
Planéité locale, rapportée au régllet de 20 cm  $f_{max} = a - b.$	3 mm	2 mm

- ➔ Comparaison à l'élément témoin

- ➔ Application du fascicule de documentation P 18-503 « Surfaces et parements de béton - Éléments d'identification » afin de valider les caractéristiques de planéité, de texture et de teinte



Les contrôles à postériori

• LES ESSAIS

➤ Contrôle de l'enrobage des aciers

En partant du principe que le ferrailage a été contrôlé préalablement à la phase de bétonnage (Point d'arrêt), un contrôle d'enrobage sur béton durci permettra de vérifier que la méthode et les moyens utilisés pour le bétonnage d'une partie d'ouvrage n'ont pas occasionné de déformation à la cage d'armature et que les critères de durabilité sont respectés (*enrobage = protection des aciers par rapport à une classe d'exposition pour une durée de vie donnée*)

Extrait du Fascicule 65 - § 74.2

Le contrôle de la mise en œuvre des armatures pour béton armé est effectué dans le cadre du contrôle intérieur selon les modalités prévues au plan qualité.

L'entrepreneur met le maître d'œuvre en mesure de s'assurer du bon déroulement du contrôle intérieur du ferrailage, avec un préavis suffisant pour lui permettre d'assurer un contrôle extérieur.

Le plan qualité explicite les dispositions prises pour contrôler l'enrobage des armatures après bétonnage ().*

** Les insuffisances d'enrobage réduisent la protection des armatures, dont la corrosion provoque des défauts d'aspect des parements et diminue la durabilité de l'ouvrage.*

Le marché stipule, en tant que de besoin, les conditions de contrôle de l'enrobage des armatures après bétonnage (type de matériel, procédures, interprétation des contrôles).

Les contrôles à postériori

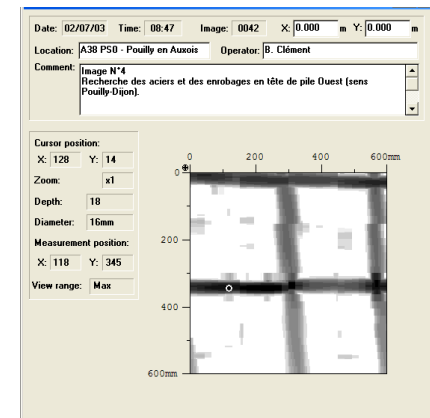
• LES ESSAIS

➔ Contrôle de l'enrobage des aciers

Les matériels et les techniques disponibles sont :

- **Les pachomètres ou profomètres** (technique Electro-Magnétique B.F.) : ils permettent un repérage bi-directionnel manuel, sans représentation graphique, l'approche de la profondeur et du diamètre des armatures B.A. est possible mais il convient de se méfier des recouvrements d'armatures qui perturbent notablement les résultats.
- **Les scanners** (technique Electro-Magnétique B.F.) : ils permettent un repérage bi-directionnel avec représentation graphique directe en plan X Y et possibilité de trouver Z pour de faibles profondeurs; la détermination du diamètre des armatures B.A. est possible en choisissant les zones visuellement les plus favorables sur la carte obtenue. Ce matériel n'est couramment utilisable que sur des surfaces relativement importantes (> 60x60 cm) et pour des épaisseurs limitées à 8-10 cm.

➔ Ex: FERROSCAN



Les contrôles à postériori

- **Les essais**

- **Contrôle de l'enrobage des aciers**

- **Les radars** : ils permettent un repérage bi-directionnel avec représentation graphique directe en plan X Z pour un Y donné; ils ne permettent pas de déterminer le diamètre des armatures. L'investigation peut concerner une profondeur de 20 à 60 cm de béton mais son exploitation est lourde et nécessite un étalonnage (destructif)

Remarque :

Ces trois premières techniques, ne nécessitant l'accès qu'à une seule face, ne sont pas assez fiables, voire aveugles, si la densité des armatures est importante ou lorsqu'il y a des recouvrements.



Les contrôles à postériori

- **LES ESSAIS**

- ➔ Contrôle de l'enrobage des aciers

- **La gammagraphie** : elle réalise la projection sur un plan X Y des objets présents dans le volume radiographié. A partir de deux expositions en décalant l'émetteur (gammagraphie double exposition), on peut obtenir la position Z de l'armature et son diamètre. Cette technique, dont le principal inconvénient est la difficulté de mise en œuvre du fait des contraintes de radioprotection, ne permet que rarement de discriminer les armatures quand elles sont nombreuses et que leur projection est groupée. Par contre, pour les armatures de béton armé, elle permet de savoir si l'armature est lisse ou crantée (HA) et pour les armatures de précontrainte si elle est constituée de fils, de torons ou de barres. Elle permet également d'explorer des sections d'épaisseur faiblement variable (ex: goussets faiblement inclinés) par recours à l'exploitation des images numériques obtenues en lieu et place des images argentiques.



Remarque : Cette technique nécessite l'accès aux deux faces de l'élément et a des limites d'épaisseur de pièce fonction du type de source utilisée (maxi 60 cm environ)

Les contrôles à postériori

- **LES ESSAIS**

- ➔ **Indice de rebondissement** (dureté de surface)

Norme NF EN 12 504-2 – Essais pour bétons dans les structures -
Partie 2 : essais non destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement

- **Principe**

Une masse propulsée par un ressort projette une tige de percussion au contact de la surface. Le résultat de l'essai est exprimé par la mesure de la distance de rebondissement de la tige. Cette distance est d'autant plus grande que la résistance est élevée.

L'indice de rebondissement peut être utilisé pour évaluer l'homogénéité du béton **in situ**, pour délimiter des zones ou surfaces de faible qualité ou des détérioration de la structure du béton.

Cela ne se substitue pas aux essais de résistance à la compression du béton mais cela peut fournir une estimation de cette résistance in situ du béton si des corrélations fiables sont établies.

- **Appareil**

L'appareil utilisé est un scléromètre Schmidt modèle N adapté à des mesures sur béton dont la résistance est comprise entre 10 et 70 MPa.



Les contrôles à postériori

• LES ESSAIS

➔ Indice de rebondissement (dureté de surface)

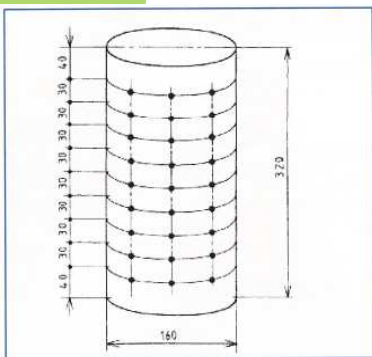
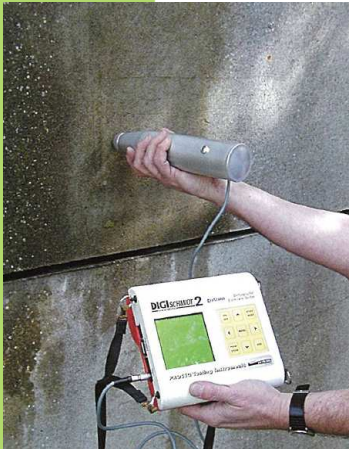
• Méthodologie

Trois étapes pour faire une mesure de dureté de surface au scléromètre :

- Vérification du bon fonctionnement de l'appareil (étalonnage sur enclume en acier dont les propriétés sont connues)
- Établissement de la valeur de référence sur une zone saine de béton et dont la résistance est connue
- Exécution de l'essai selon le mode opératoire adopté

• Avantages et inconvénients de la méthode

- Mesures rapide
- Nécessite un étalonnage précis en vue d'estimer une résistance béton
- Épaisseur mini du béton de 100 mm et élément encastré dans une structure
- Nécessite de nombreux points de mesure pour obtenir une valeur moyenne (9 mesures par point selon la norme)
- Utilisable seulement sur les surfaces lisses (meulage préalable éventuel) et sans trace d'humidité ni écaillage ni porosité élevée
- Mesure superficielle



Les contrôles à postériori

- **LES ESSAIS**

- Auscultation sonique

Les méthodes d'auscultation sonique permettent de déterminer des caractéristiques mécaniques du milieu ausculté et d'en apprécier l'homogénéité (en détectant des vides, délaminage et microfissuration), de caractériser un béton dont le rapport E/C est incorrect ou ayant subi une modification structurelle (cas des bétons gelés)

Les mesures sont réalisées in-situ comparativement sur zone saine et dégradée, et/ou en laboratoire sur des carottes prélevées dans ces zones. Les informations collectées permettent de dresser une cartographie de l'étendue du désordre et d'en déterminer la gravité et la profondeur affectée.

Attention, dans le cas des fondations profondes, le désordre sera confirmé par carottage L'auscultation mettra seulement en évidence une « singularité »

Plusieurs méthodes et moyens à disposition en fonction de la partie d'ouvrage à contrôler (pieux enterrés, une ou plusieurs faces accessibles, fissures de surface)



Les contrôles à postériori

- **LES ESSAIS**

- Auscultation sonique

Les paramètres mesurés sont :

- La vitesse de propagation des ondes
- L'atténuation sonique des ondes

Norme NF P 91-160-1 - Auscultation d'un élément de fondation –
Partie 1 : Méthode par transparence

Norme NF P 18-418 – Béton : auscultation sonique – mesure du temps
de propagation d'ondes soniques dans le béton

Norme NF EN 12 504-4 – Essais pour bétons dans les structures -
Partie 4 : détermination de la vitesse de propagation du son



Les contrôles à postériori

• LES ESSAIS

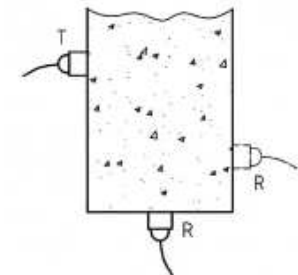
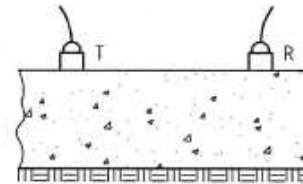
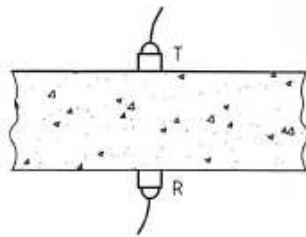
➔ Auscultation sonique

• Plusieurs méthodes en fonction des contrôles

- Auscultation sonique par transparence (fondations profondes ou éléments de faible épaisseur accessible sur deux faces = méthode directe)
- Auscultation de surface (éléments non enterrés ou au moins une face est accessible = méthode indirecte)
- Auscultation par transparence (sur carottes prélevées dans l'ouvrage = méthode directe)

**NON
DESTRUCTIF**

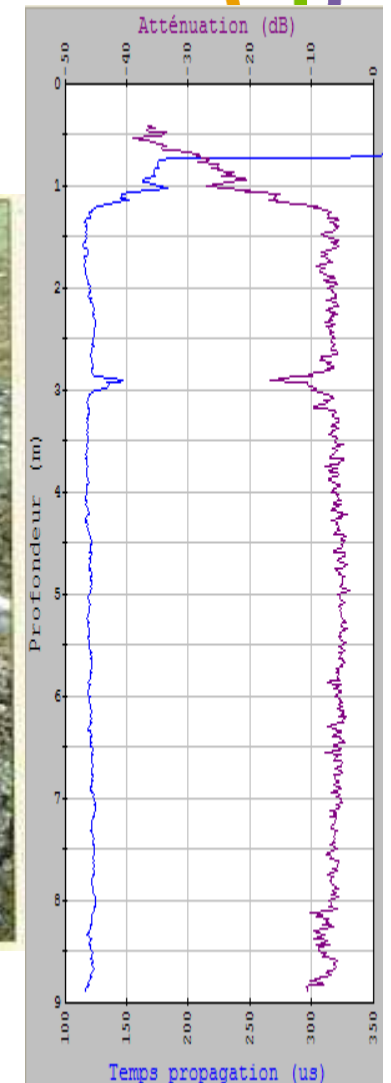
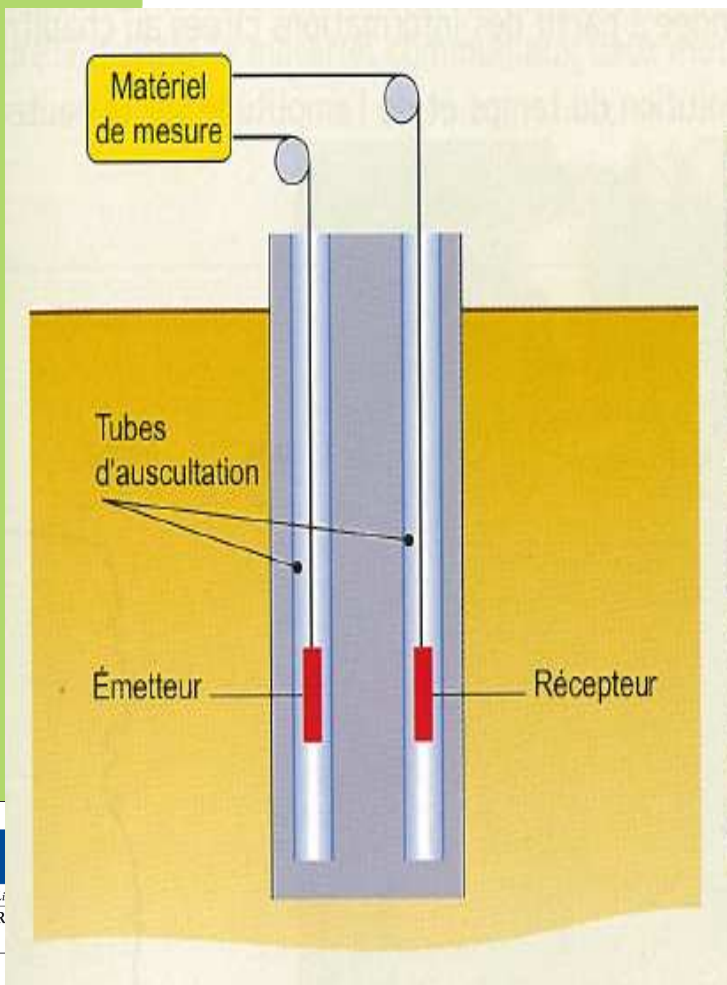
DESTRUCTIF



Les contrôles à postériori

- **LES ESSAIS**

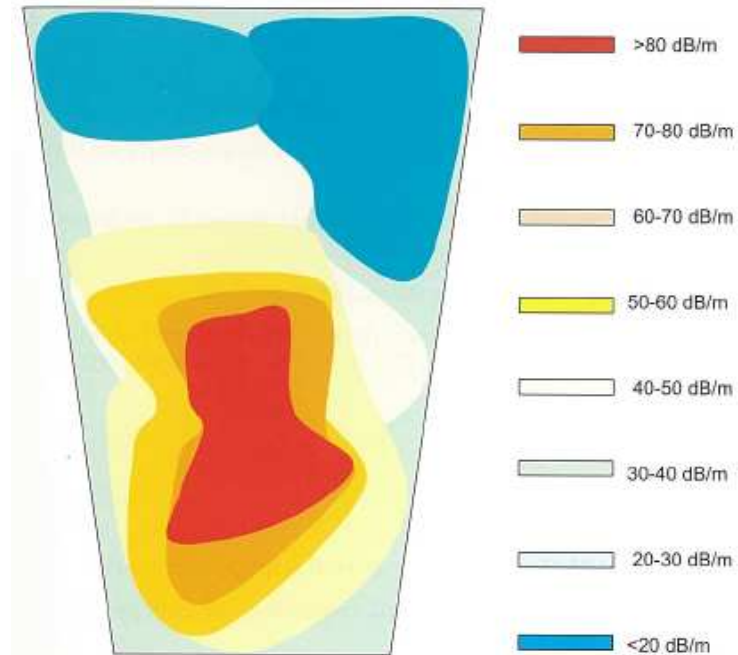
- ➔ Auscultation sonique



Les contrôles à postériori

- **LES ESSAIS**

- Auscultation sonique



Les contrôles à postériori

- **LES ESSAIS**

- ➔ Mesure de perméabilité de surface

La mesure de la perméabilité de surface du béton détermine l'aptitude du parement aux échanges hydriques et gazeux avec le milieu ambiant, c'est à dire la possibilité de pénétration des agents agressifs (dont CO_2 et Cl^-).

Il consiste à créer une dépression à l'intérieur d'une cloche étanche appliquée à la surface du parement et à mesurer le délai nécessaire pour le rétablissement de la pression atmosphérique à l'intérieur de la cloche.

C'est un indicateur (information) qui permet essentiellement de travailler en comparatif (sauf à avoir spécifié une exigence contractuelle spécifique)

Exemples d'utilisation :

Vis à vis de la qualité du béton d'enrobage (aspect durabilité), cela permet de vérifier la porosité de surface du béton d'une partie d'ouvrage (à corréliser avec des mesures obtenues lors d'essais préalables: convenances, élément témoin...).

Dans le cas d'application de produits de protection il peut aussi servir à réceptionner que le produit mis en œuvre réduit la perméabilité à l'air de la surface du parement.



Les contrôles à postériori

- **LES ESSAIS**

- Mesure de la résistivité électrique

(généralement associé à un diagnostic de corrosion du béton armé par méthodes électrochimiques...)

La résistivité du béton est directement liée au niveau d'humidité présent dans les pores du béton.

Plus le béton est poreux, plus la quantité d'humidité résiduelle est élevée et plus la résistivité est faible.

Ce qui signifie que le béton armé avec une résistivité élevée présentera moins de risque de corrosion.



Les contrôles à postériori

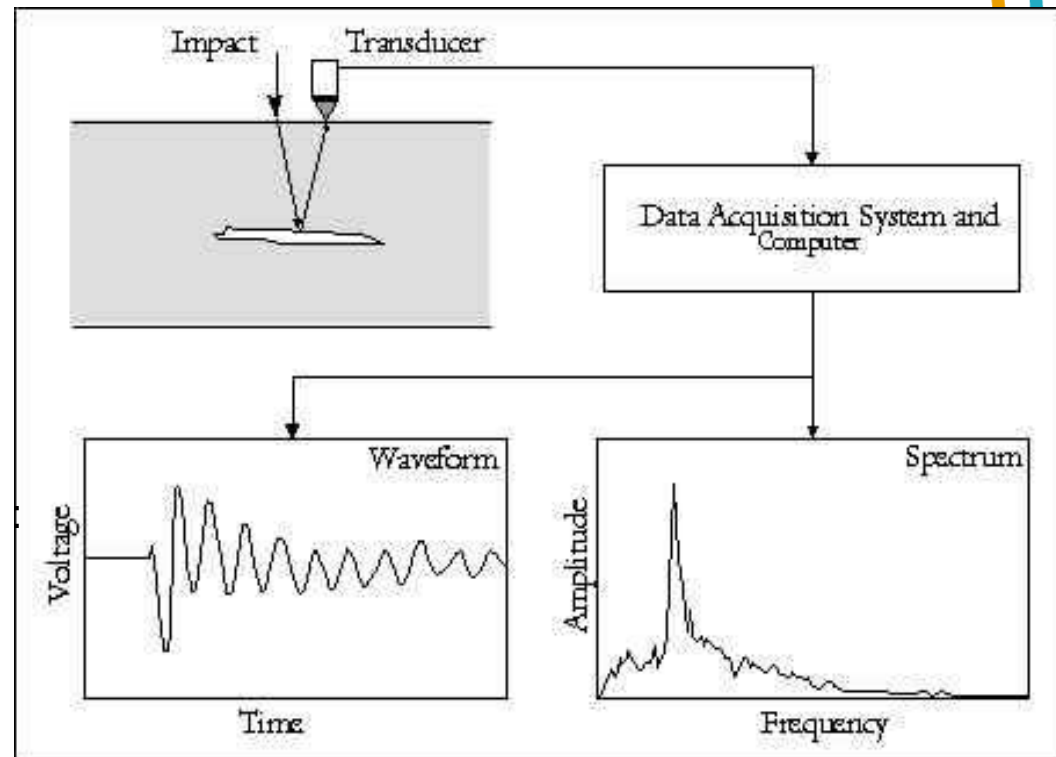
• LES ESSAIS

➔ Impact-écho pour épaisseur de béton

Détermination d'une épaisseur de béton par mesure de vitesses des ondes dans le béton.

Principe :

- ➔ Impact mécanique d'une bille
- ➔ 1 à 100 kHz
- ➔ Etude des ondes P
- ➔ Récepteur piézo-électrique
- ➔ Enregistrement : Tension signal = f (temps)
- ➔ Transformée en spectre de fréquences : Amplitude = f (fréquence)



Les contrôles à postériori

• LES ESSAIS

➤ Impact-écho pour épaisseur de béton

Nécessite un étalonnage

- En déterminant la vitesse de transmission des ondes propres au béton (méthode sonique)
- En utilisation de la méthode comparative si deux faces opposés de l'élément sont accessibles et permettent de se caler pour une épaisseur donnée.



Les contrôles à postériori

- **LES ESSAIS**

- Caméra IR

Certaines surprises au décoffrage d'éléments d'ouvrage (nid de cailloux, fuite de laitance ...) imposent quelques-fois aux entreprises de recourir à des produits de réparation de surface (mortier de ragréage ...).

L'application de ces produits impose certaines règles de mise en œuvre qui ne sont pas toujours respectées (support, préparation, application, conditions météo...) se traduisant quelque-fois par des effets inverses que ceux escomptés.

Actuellement en phase de recherche, l'utilisation de la caméra infrarouge pour ce domaine d'application permettrait de mettre en évidence une mauvaise application de produits de réparation à la surface du béton en contrôlant la présence de décollements (vide d'air) entre le produit et le béton de structure.



Les contrôles à postériori

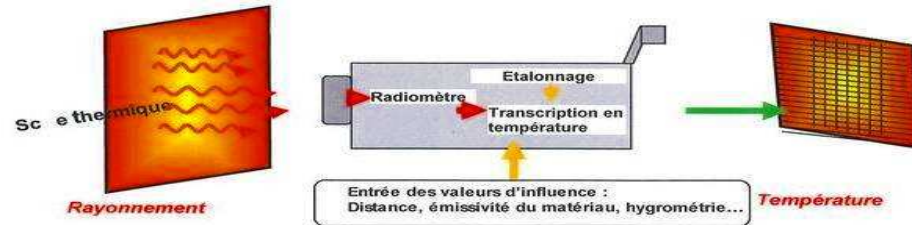
• LES ESSAIS

+ Caméra IR

Rappel :

Tout matériau émet des ondes électromagnétiques : **il rayonne.**

Une caméra infrarouge, bien que fournissant une image thermique, révèle un **phénomène de transfert thermique**; elle est sensible à **l'énergie rayonnée** et non à la température. De plus, elle n'est sensible qu'au **flux thermique observé sur la surface de l'objet examiné.**



Donc, sur le même principe que l'utilisation de la caméra IR pour la réception des chapes d'étanchéité ou le collage de renforts composites, il serait possible de mettre en évidence un vide entre le béton de structure et le produit de réparation. Ce qui traduirait une mauvaise adhérence entre ces deux matériaux. D'où une mauvaise réparation.

Exemple de réparation qui ne tolère pas de défaut d'application ; réparation d'une épaufrure ou éclat, d'un nid de cailloux avec aciers visibles dont la réparation se décolle et laisse s'infiltrer l'eau de ruissellement ou de projection, chargée de sels de déverglaçage.



Les contrôles à postériori

• LES ESSAIS

➔ Autres types d'essais nécessitant un carottage

(application de la norme NF EN 12 504-1)

Il s'agit donc d'essais **destructifs**.

Ils ne seront proposés qu'en cas de **contentieux**.

Les essais principaux qui seraient susceptibles d'être utilisés dans ce cas sont les suivants :



- ➔ Essais de résistance à la compression du béton (voir fendage si nécessaire ou traction pour du béton projeté) – NF EN 12 504-1
- ➔ Auscultation sonique (méthode directe par transparence)
- ➔ Essais de caractérisation de la tenue du béton au gel et aux sels de déverglaçage
 - ➔ Vérification du facteur d'espacement des vides d'air ou L barre (carottage Ø160 mm)
 - ➔ Essai d'écaillage (carottage Ø160 mm)
 - ➔ Essai de gel interne (carottage Ø160 mm)

Les contrôles à postériori

- **LES ESSAIS**

- Autres types d'essais nécessitant un **carottage**

- + RAG et RSI

- Dans le cas de doutes justifiés de problèmes de ce type, l'objectif est d'établir un pronostic sur l'évolution du phénomène et ses conséquences sur l'ouvrage.

- Ce pronostic s'appuie sur une évaluation du potentiel de gonflement futur du béton à partir de carottes prélevées sur l'ouvrage. Pour cela, les carottes sont soumises à un **essai d'expansion accéléré** qui consiste à les placer dans un environnement favorisant la réaction, et à mesurer leur déformation au cours du temps afin de déterminer si le gonflement du béton de l'ouvrage peut encore augmenter fortement.

- Le choix du mode opératoire de l'essai d'expansion résiduelle dépend de la nature de la réaction :

- + méthode LPC n°44, pour l'alcali-réaction

- + méthode LPC n°67 pour la réaction sulfatique



Les contrôles à postériori

• LES ESSAIS

Autres types d'essais nécessitant un carottage

+ Analyse minéralogique complète du béton

Expertiser à l'aide d'analyses physico-chimiques un échantillon de béton suspecté de présenter une pathologie ou de composition à évaluer.

L'analyse minéralogique détaillée permet :

- + de caractériser la compacité du béton ;
- + d'identifier la nature du liant et des granulats ;
- + de déterminer la formule du béton simplifiée (dosage en ciment, eau et granulats) ;
- + de déterminer la présence éventuelle de produits délétères à l'origine des désordres observés sur structure.



Spectromètre
d'absorption
atomique



Microscope
électronique à
balayage

Les contrôles à postériori

• LES ESSAIS

➤ Autres types d'essais nécessitant un carottage

• Analyse pétrographique du béton

Expertiser à l'aide d'une analyse pétrographique un échantillon de béton suspecté de présenter une pathologie.

L'analyse pétrographique a pour but, au moyen d'observations avec divers types de microscopes, de déceler les espèces minérales susceptibles d'entraîner des désordres lors de leur incorporation au béton, et de constater la présence de désordres et de produits délétères au sein d'un béton.

Elle permet notamment d'identifier :

- La présence de granulats potentiellement réactifs
- La présence de minéraux altérés et de minéraux sensibles en milieu alcalin
- La présence de désordres (type et localisation de la fissuration, fissures comblées par des produits, auréoles d'alcali-réaction autour des granulats,)
- La qualité de la pâte de ciment (fissuration, mauvaise liaison avec les granulats, porosité élevée,...)
- Le type de ciment, son degré d'hydratation, l'évaluation qualitative de la présence de portlandite dans la pâte de ciment, l'homogénéité de la pâte...
- Les délaminations se développant parallèlement à la surface et provoqués par l'action du gel-dégel



Les contrôles à postériori

• CONCLUSION

Comme il a été rappelé plusieurs fois au cours des précédentes présentations, la majorité des contrôles en cours de production est à la charge des entreprises et le rôle de la **maîtrise d'œuvre** est de **contrôler** la bonne application de leur PQ respectif et de **réceptionner** les éléments à différentes étapes de la construction.

Un panel important d'essais a postériori sont à disposition de la maîtrise d'œuvre, pour l'aider à réceptionner des éléments béton ou en cas de problèmes d'exécution (investigations):

- ➔ Essais non destructif
- ➔ Essais destructifs

Par contre, il est essentiel de contrôler avant pour limiter la conséquence de certains défauts (par exemple défauts d'enrobage); on ne peut restreindre le contrôle extérieur à un contrôle a postériori!